

ЭПТ 2015



ACEC 2015

УДК 62-83:621.313.33

**3.3. К ОЦЕНКЕ ВЛИЯНИЯ КОЛЕБАНИЙ
ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ
ИЗОЛЯЦИИ ОБМОТКИ СТАТОРА АСИНХРОННЫХ
ДВИГАТЕЛЕЙ В СЛУЧАЙНЫХ РЕЖИМАХ
НАГРУЖЕНИЯ
TOWARD THE EVALUATION OF THE INFLUENCE
OF TEMPERATURE FLUCTUATIONS ON THE
DURABILITY OF THE STATOR WINDING
INSULATION OF ASYNCHRONOUS MOTORS IN
RANDOM MODE LOADING**

Браславский Исаак Яковлевич, доктор техн. наук, проф. каф. ЭАПУ Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: i.ya.braslavskiy@urfu.ru, тел.: +7 (343) 3754646

Метельков Владимир Павлович, к.т.н., доцент каф. ЭАПУ Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru

Есаулкова Дина Владимировна, ст. преподаватель каф. ЭАПУ Уральского федерального университета им. первого Президента России Б.Н.Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: d.v.esaulkova@urfu.ru

Костылев Алексей Васильевич, к.т.н., доцент, зав. кафедры ЭАПУ ФГАОУ ВПО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н.Ельцина» кандидат технических наук, доцент, зав. кафедры ЭАПУ, E-mail: a.v.kostylev@urfu.ru, тел.: +7 (343) 3754646

Isaak I. Braslavsky, Doctor Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: i.ya.braslavskiy@urfu.ru, Ph.: +7(343)3754646

Vladimir P. Metelkov, Cand. Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: v.p.metelkov@urfu.ru

Dina V. Esaulkova, senior teacher, Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: d.v.esaulkova@urfu.ru

Alex V. Kostylev, Cand. Sc., Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira street, 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: a.v.kostylev@urfu.ru, тел.: +7 (343) 3754646

Аннотация: В статье обсуждается влияние колебаний температуры обмотки электродвигателя на скорость старения изоляции обмотки статора асинхронного двигателя при работе в случайных режимах нагружения. Показано, что при определенных параметрах случайного режима работы срок службы изоляции может существенно снижаться, при этом широко используемый для оценки теплового состояния двигателя метод средних потерь дает оценку теплового состояния двигателя с существенной ошибкой.

Abstract: The influence of the stator winding temperature oscillation on the insulation-aging rate of the asynchronous motors stator winding in random mode loading. It is shown that under certain parameters of the random mode insulation durability can significantly decrease, wherein the widely used average loss method gives the evaluation of the motor thermal state with a substantial error. длина строка 10 pt)

1. ФОРМУЛИРОВКА ЗАДАЧИ

В различных отраслях промышленности существует широкий круг электроприводов, работающих с нагрузкой, величина которой определяется различными факторами, имеющими случайный характер. К ним относятся, например, электроприводы транспортных механизмов, экскаваторов, лифтов и многие другие. При работе электропривода в таких режимах величина потерь, выделяющихся в электродвигателе, может существенно изменяться, что вызывает и значительные колебания температуры его обмоток.

Из-за случайного характера изменения нагрузки процедура выбора двигателя для таких электроприводов и оценка его теплового состояния оказывается не простой задачей. Эта задача осложняется еще и тем, что скорость термического старения изоляции обмотки связана с ее температурой экспоненциальной зависимостью [1], поэтому при колебаниях температуры с разной амплитудой, но одинаковым средним значением будет не одинакова средняя за некоторый период времени скорость старения изоляции. Это объясняется тем, что ускорение старения изоляции при отклонении температуры вверх от средней не компенсируется ее уменьшением при отклонении вниз от средней. Следовательно, при любых отклонениях температуры обмотки от средних значений термический ресурс изоляции будет расходоваться быстрее, чем при постоянной температуре, что приведет к сокращению срока службы электродвигателя. Используемые классические методы оценки теплового состояния на основе метода средних потерь и выводимых из него методов эквивалентных величин, это факт не учитывают [2].

Задача исследования - выяснение возможностей учета явления ускорения расхода термического ресурса изоляции из-за колебаний температуры обмотки потерь для электроприводов, работающих в режимах со случайным характером нагружения при оценке теплового состояния двигателя. Ее решение позволит обеспечить более адекватный выбор двигателей для электроприводов, работающих в рассматриваемом режиме нагружения, избежав, с одной стороны, сокращения срока службы двигателя по сравнению с нормативным, а с другой стороны, выбора двигателя с неоправданно завышенной мощностью.

2. ОПИСАНИЕ ОБЪЕКТА И УСЛОВИЙ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе исследуется нагрев асинхронных двигателей малой и средней мощности закрытого

исполнения, так как такие двигатели составляют абсолютное большинство в промышленности и сельском хозяйстве. Работа двигателя рассматривается при постоянной скорости (если не принимать во внимание статическую просадку из-за конечной жесткости механической характеристики). Длительность электромагнитных переходных процессов считаем много меньшей, чем длительность участков нагрузочной диаграммы при постоянной нагрузке.

Ранее были проведены подобные исследования на простейшем цикле, включающем рабочий интервал и паузу [2]. На практике значительно чаще встречается работа при более сложных циклах нагружения. Вариантов организации рабочих циклов может быть много, поэтому для детерминированных, но достаточно сложных циклов целесообразно также использование статистического подхода. Это вызывается следующими обстоятельствами. При большой длительности цикла (по отношению к величине наибольшей постоянной времени нагрева электродвигателя), такой режим нельзя относить к коротко-циклическим продолжительным режимам. Здесь длительность участков цикла может быть достаточно велика и его следует относить к режимам, попадающим в зону S0 (Р.Т. Шрейнер) [3]. Выбор двигателя при работе в этой зоне таким же образом, как это делается для продолжительного режима S1, приводит к завышению мощности, а выбор с использованием формул классического метода средних потерь, приводит также к большим ошибкам из-за не учета влияния колебаний температуры, которые в данном случае могут иметь большую амплитуду. Использование метода эквивалентных потерь [3], приводит к неоправданной сложности выражений для циклов, содержащих много участков с разной нагрузкой, и также не решает проблему учета влияния колебаний температуры на скорость расхода термического ресурса изоляции.

В данном исследовании рассматривается нагрев двигателя при бесконечной последовательности циклов, каждый из которых содержит определенное количество участков со случайным характером величины нагрузки или случайной длительностью участка. Исследование проводилось для режима S6 с использованием 5-массовой термодинамической модели двигателя 4А225М4 с учетом температурного изменения сопротивлений обмоток. Для придания большей общности полученным результатам, термодинамическая модель была построена с использованием системы относительных единиц. В качестве базисной теплоемкости принята суммарная теплоемкость всех греющихся узлов модели: $C_6 = C_{\Sigma}$, в качестве базисной мощности потерь - суммарная мощность потерь в двигателе при работе в номинальном режиме: $\Delta P_6 = \Delta P_{N\Sigma}$. За

базисную температуру принимаем предельно допустимое для данного класса нагревостойкости изоляции превышение температуры обмотки статора по ГОСТ Р 52776-2007 [4]: $\theta_6 = \tau_{\text{доп}}$. Тогда базисная теплопроводность: $\lambda_6 = \Delta P_{N\Sigma} / \tau_{\text{доп}}$, базисное время (постоянная времени): $T_6 = C_{\Sigma} \tau_{\text{доп}} / \Delta P_{N\Sigma}$. При таком выборе системы базисных величин T_6 оказывается весьма близкой к величине наибольшей постоянной времени термодинамической модели.

Зачастую исследования случайных процессов в электроприводах ведутся применительно только к нормальному закону распределения вероятностей [5]. Но следует иметь в виду, что распределения величин нагрузки и длительности интервалов нагрузочной диаграммы могут, в общем случае, подчиняться разным законам распределения [6].

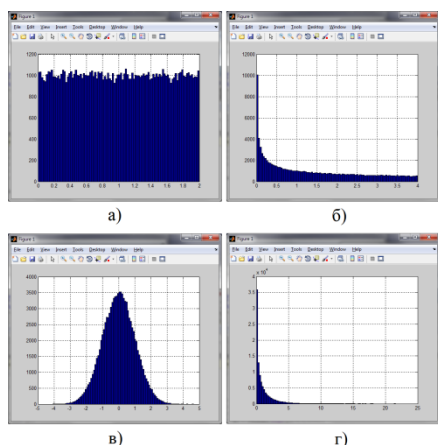


Рис. 1. Гистограммы распределения случайной величины и ее квадрата

Важно учитывать, что мощность потерь в обмотках связана с величиной нагрузки (моментом) зависимостью, близкой к квадратичной. Закон статистического распределения квадрата случайной величины не совпадает с законом статистического распределения самой величины [7]. На рис. 1 показаны гистограммы распределения вероятности для 10^5 значений некоторой случайной величины (а, в) и квадрата этой величины (б, г) для равномерного (а, б) и нормального (в, г) законов распределений вероятностей.

На рис. 1 видно, что законы распределения для квадрата случайной величины радикально отличаются от законов распределения самой величины. Это означает, что при моделировании случайных режимов работы электроприводов закон распределения величины мощности потерь будет очень существенно отличаться от закона распределения величины момента. То есть, нельзя переносить закон распределения величин нагрузки двигателя, характеризуемых развиваемым им моментом, на распределение величин мощностей

потерь, которые в нем выделяются. По этой причине, при моделировании задавался момент двигателя, значения которого подчинялись заданному закону распределения, по графику момента рассчитывался график мощностей потерь, который и подавался на вход термодинамической модели. При этом вертикальный масштаб графика нагрузки (момента) выбирался таким, чтобы средняя за цикл суммарная мощность потерь была равна номинальной мощности потерь.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Случайная величина нагрузки и одинаковые по длительности интервалы нагрузочной диаграммы (Δt).

На рис. 2,а показаны графики зависимости коэффициента ускорения расхода ресурса изоляции (ΔR) от среднего квадратического отклонения суммарной мощности потерь ($\sigma_{\Delta P}$) при равномерном законе распределения момента двигателя. На рис. 2,а обозначено: 1 – лобовые части обмотки; 2 – пазовая часть. Графики строились при соблюдении условия

$$\Delta P_{\text{ср}} = \Delta P_N, \quad (1)$$

где $\Delta P_{\text{ср}}$ – средняя мощность потерь в двигателе, ΔP_N – номинальная мощность потерь.

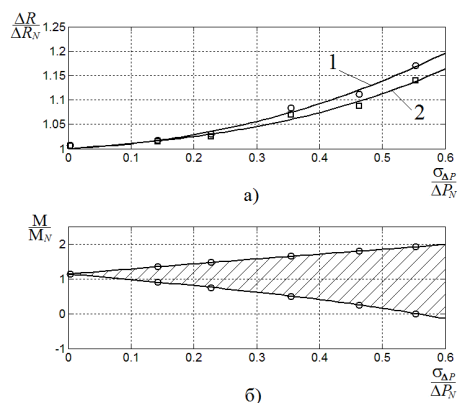


Рис. 2. Зависимости коэффициента ускорения расхода ресурса изоляции (а) и диапазона изменения моментов нагрузки (б) от среднего квадратического отклонения суммарной мощности потерь

На рис. 2,б показан диапазон изменения моментов нагрузки от среднего квадратического отклонения суммарной мощности потерь в цикле обеспечивающий выполнение условия (1). Графики построены для $\Delta t / T_6 = 0,01$.

На рис. 3 показаны зависимости коэффициента ускорения расхода ресурса изоляции от относительной продолжительности интервалов нагрузочной диаграммы для нормального (1) и

равномерного (2) законов распределения момента двигателя. При нормальном распределении максимальная величина момента ограничивалась на уровне $\pm 2,5M_N$ (где M_N – номинальный момент), что соответствует перегрузочной способности используемого двигателя. Графики получены при соблюдении условия (1), выполнение которого при равномерном законе распределения величины момента достигалось подбором границ области его изменения в диапазоне от 0 до $(1,92...1,94)M_N$, а при нормальном законе – подбором величины среднего квадратичного отклонения момента для каждого значения Δt .

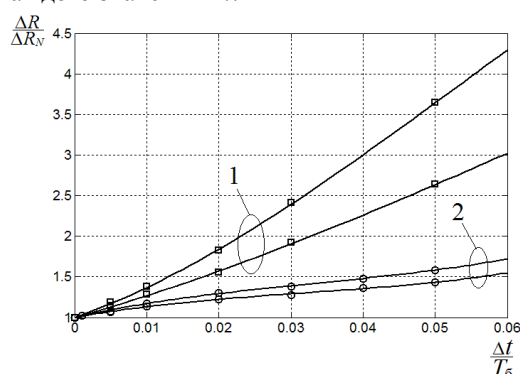


Рис. 3. Зависимости коэффициента ускорения расхода ресурса изоляции от относительных продолжительностей интервалов нагрузочной диаграммы

3.2. Случайная величина нагрузки и случайные по длительности интервалы работы.

В данном случае моделировался нагрев двигателя, работающего с бесконечной последовательностью циклов, состоящих из десяти случайных по длительности интервалов Δt при случайном значении момента двигателя на каждом интервале. Использовался равномерный закон распределения момента и закон распределения Пуассона

для продолжительности интервалов нагрузочной диаграммы [6]. Вариабельность временных интервалов характеризовалась их средним квадратичным отклонением ($\sigma_{\Delta t}$).

На рис. 4 показана поверхность $\Delta R/\Delta R_N = f(\sigma_{\Delta t}, \sigma_{\Delta P})$. График получен при соблюдении условия (1) при длительности цикла, равной базисному времени. Видно, что вариабельность временных интервалов слабее влияет на ускорение расхода ресурса изоляции, чем вариабельность нагрузки.

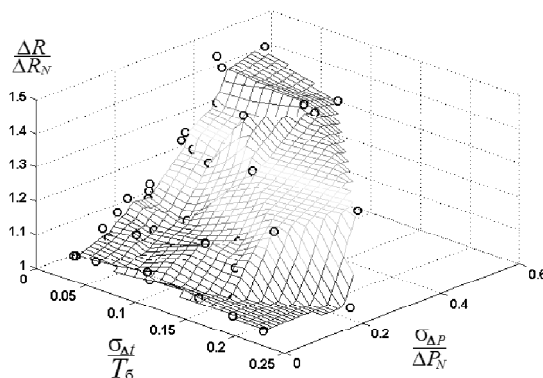


Рис. 4. График коэффициента ускорения расхода ресурса изоляции при случайных величинах нагрузки и Δt

4. ВЫВОДЫ

Ускорение расхода ресурса изоляции при работе электропривода в режимах случайного нагружения с большой дисперсией нагрузки может приводить к очень существенному (в разы) сокращению срока службы изоляции обмотки по сравнению с режимом работы при постоянной нагрузке с такой же средней величиной мощности потерь. Этот эффект возрастает при увеличении характерных продолжительностей интервалов нагрузочной диаграммы и требует учета при выборе и проверке электродвигателя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Котеленец Н. Ф., Кузнецов Н. Л. Испытания и надежность электрических машин : учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 1988. 232 с.
2. Zyuzev A. M., Metelkov V. P. Toward the Evaluation of the Thermal State of an Induction Motor in the Recursive Short Term Mode // Russian Electrical Engineering, 2014, Vol. 85, No. 9, pp. 554–558.
3. Шрейнер Р. Т., Костылев А. В., Кривовяз В. К., Шилин С. И. Электромеханические и тепловые режимы асинхронных двигателей в системах частотного управления : учеб. пособие. Екатеринбург: ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2008. 361 с.
4. ГОСТ Р 52776-2007. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики. Введ. 31-10-2007. М.: Стандартиформ, 2008. 69 с.
5. Ратнер Н. И. Расчет электроприводов в случайных режимах. М.: Энергия, 1969. 127 с.
6. Гайдукевч В. И., Титов В. С. Случайные нагрузки силовых электроприводов. М.: Энергоатомиздат, 1983. 160 с.
7. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник для вузов. М.: «Сов. радио», 1977. 608 с.